

5 种热带花灌木对旱涝胁迫的生理和形态 响应及园林应用*

李 灿^{1,2}, 翁殊斐^{1**}, 秦昊林¹, 王晓帆¹

(1. 华南农业大学 林学与风景园林学院, 广东 广州 510642; 2. 中山大学新华学院, 广东 广州 510520)

摘要:【目的】研究 5 种热带花灌木在不同水分胁迫处理下生理及形态指标的变化, 以揭示植物对旱涝胁迫的响应规律。【方法】以黄蝉 (*Allemanda schottii*)、栀子 (*Gardenia jasminoides*)、斑叶鹅掌藤 (*Schefflera arboricola* ‘Variegata’)、钟花蒲桃 (*Syzygium campanulatum*) 和狗牙花 (*Tabernaemontana divaricata*) 5 种热带花灌木为试验材料, 对其进行正常供水 (CK)、干旱 (CD)、水淹 (CF)、旱涝交替 (FD) 4 个水分胁迫处理, 观察不同水分胁迫处理下植物的形态变化并测定各项生理指标, 并用模糊隶属函数法进行植物抗逆性的综合评价。【结果】干旱胁迫下钟花蒲桃叶片受害最严重 (VI 级), 5 种花灌木的 SOD 活性均下降、丙二醛含量均上升, 斑叶鹅掌藤叶绿素含量显著下降 ($P<0.05$); 淹水胁迫显著影响植物的外部形态, 栀子长出新根, 黄蝉形成肥大皮孔并长出大量新根和新叶, 斑叶鹅掌藤大量叶片萎蔫、根部严重腐烂, 狗牙花大量落叶, 淹水胁迫下 5 种花灌木的叶绿素含量显著下降 ($P<0.05$)、可溶性蛋白含量下降、丙二醛含量上升, 斑叶鹅掌藤和狗牙花的 SOD 活性显著下降 ($P<0.05$); 旱涝交替胁迫下黄蝉和钟花蒲桃的叶片形态分别表现为 I 级和 II 级, 5 种花灌木的叶绿素含量均下降, 除狗牙花 SOD 活性上升外, 其他 4 种植物均下降。【结论】综合隶属函数和植物形态分析, 5 种花灌木耐旱性从强到弱依次为斑叶鹅掌藤、狗牙花、黄蝉、栀子、钟花蒲桃; 耐涝性从强到弱依次为栀子、钟花蒲桃、黄蝉、斑叶鹅掌藤、狗牙花; 对旱涝交替胁迫的适应性从强到弱依次为黄蝉、钟花蒲桃、斑叶鹅掌藤、狗牙花、栀子。黄蝉可配置于雨水花园和滨水河岸带等环境, 斑叶鹅掌藤和狗牙花是建设屋顶花园、节水型绿地的优良植物材料, 栀子和钟花蒲桃可配置于滨水绿地、淡水湿地或土壤较为湿润的环境。

关键词: 热带花灌木; 旱涝胁迫; 生理; 形态; 园林应用

中图分类号: S 718.43

文献标识码: A

文章编号: 1004-390X (2020) 02-0318-06

Physiological and Morphological Responses of Five Tropical Flowering Shrubs to Drought and Waterlogging Stress and Their Landscape Utilization

LI Can^{1,2}, WENG Shufei¹, QIN Haolin¹, WANG Xiaofan¹

(1. College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;

2. Xinhua College of Sun Yat-sen University, Guangzhou 510520, China)

Abstract: [Purpose] The physiological and morphological changes of five tropical flowering shrubs under different water stress treatments were studied to reveal the response of plants to drought and waterlogging stress. [Method] *Allemanda schottii*, *Gardenia jasminoides*, *Schefflera arboricola*

收稿日期: 2019-09-29

修回日期: 2020-02-27

网络首发时间: 2020-05-12 16:46:39

*基金项目: 广东省研究生教育创新计划项目 (2017JGXM-MS09)。

作者简介: 李灿 (1993—), 女, 河南濮阳人, 硕士, 主要从事园林植物与城市绿化研究。

E-mail: 1511010190@qq.com

**通信作者 Corresponding author: 翁殊斐 (1969—), 女, 广东潮州人, 博士, 副教授, 主要从事园林植物与城市绿化研究。E-mail: shufeiweng@scau.edu.cn

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1044.S.20200512.1019.002.html>



ola ‘Variegata’, *Syzygium campanulatum* and *Tabernaemontana divaricate* were used as experimental materials to conduct four water stress treatments, including normal water supply (CK), continuous drought (CD), continuous flooding (CF), drought and flooding alternation (FD). The morphological changes and the physiological indexes of plants under different water stress treatments were respectively observed and measured. And the stress resistance of plants was comprehensively evaluated by fuzzy membership function method. [Result] Under drought stress, the leaf damage of *S. campanulatum* suffered the most, which performed grade VI. The SOD activity of five flowering shrubs decreased, malondialdehyde content increased, and chlorophyll content of *S. arboricola* ‘Variegata’ decreased significantly ($P<0.05$). Flooding stress has a significant impact on the external morphology of plants. *G. jasminoides* grew new roots, *A. schottii* formed hypertrophic lenticels and grew a lot of new roots and leaves, a large number of leaves of *S. arboricola* ‘Variegata’ withered and its root rotted seriously, lots of leaves of *T. divaricate* fell. Under waterlogging stress, the chlorophyll content of five flowering shrubs decreased significantly ($P<0.05$), soluble protein content also decreased, however the malondialdehyde content increased, the SOD activity of *S. arboricola* ‘Variegata’ and *T. divaricate* decreased significantly ($P<0.05$). Under alternate stress of drought and flooding, the leaf morphologies of *A. schottii* and *S. campanulatum* were performed as grade I and II respectively, the chlorophyll content of five flowering shrubs decreased, and the SOD activity of *T. divaricate* increased, while the other four plants decreased. [Conclusion] Combining subordinate function and plant morphology, the tolerance of five flowering shrubs to drought from strong to weak was *S. arboricola* ‘Variegata’, *T. divaricate*, *A. schottii*, *G. jasminoides*, *S. campanulatum*, the tolerance of five flowering shrubs to waterlogging from strong to weak was *G. jasminoides*, *S. campanulatum*, *A. schottii*, *S. arboricola* ‘Variegata’, *T. divaricate*, and the adaptability to alternate stress of drought and flooding from strong to weak was *A. schottii*, *S. campanulatum*, *S. arboricola* ‘Variegata’, *T. divaricate*, *G. jasminoides*. *A. schottii* can be arranged in rain garden and waterfront riverbank zone, *S. arboricola* ‘Variegata’ and *T. divaricate* are excellent plant materials for building roof garden and water-saving green space, *G. jasminoides* and *S. campanulatum* can be arranged in waterfront green space, freshwater wetland or humid soil environment.

Keywords: tropical flowering shrub; drought and waterlogging stress; physiology; morphology; landscape utilization

面对城市化发展给城市带来的一系列雨洪问题,一些发达国家通过长期探索和研究,提出了新的雨洪管理理念和技术体系,如低影响开发(LID)和绿色雨水基础设施(GSI)等^[1],而植物的合理选择与配置是长期维持低影响开发与绿色雨水基础设施性能的关键因素之一^[1]。另一方面,华南地区水资源丰富,水体形式多样,滨水区植物景观因兼具景观异质性和自然性的特征而成为展现城市自然生态新形象的景观类型,在城市蓝色廊道的规划和建设中得到广泛重视^[2]。因此,研究植物对水分的适应性并选择合适的植物对华南地区海绵城市的构建和滨水植物景观营造具有

重要意义。

以往园林植物水分逆境的研究多集中于干旱或水涝等单一胁迫因子方面,选取的指标涉及生长指标^[3-4]、生理生化指标^[5-6]等,而以花灌木为研究对象,以园林应用为目标的抗旱耐涝性研究则很少。黄蝉(*Allemanda schottii*)、栀子(*Gardenia jasminoides*)、斑叶鹅掌藤(*Schefflera arboricola* ‘Variegata’)、钟花蒲桃(*Syzygium campanulatum*)和狗牙花(*Tabernaemontana divaricate*)是常用热带园林花灌木,常丛植、片植于城市公园、道路和居住区等园林绿地,具有观赏期长,花色(叶色)鲜明的热带特色。因此,本研究通过观测不

同水分胁迫处理下 5 种花灌木的形态变化,测定、分析 4 项生理指标,应用模糊隶属函数法探究植物的抗逆性。研究成果不仅加深了热带园林灌木对水分逆境的认知,还为园林花灌木的合理配置应用和养护管理提供科学依据,并为低影响开发设施在华南地区的建设及滨水植物景观营造提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料 and 设计

以黄蝉、栀子、斑叶鹅掌藤、钟花蒲桃和狗牙花等 5 种热带花灌木为试验材料,每种选择生长良好、高度一致的 300 盆苗木,2016 年 11 月 15 日开始试验。苗圃内设置透明塑料及遮光网,以防止雨水等处理外的其他因素影响。

在参考前人研究^[7-8]的基础上,将试验分为前期(0~14 d)、中期(15~28 d)和后期(29~42 d)3 个阶段,设置正常供水(CK)、干旱(continuous drought, CD)、水淹(continuous flooding, CF)和旱涝交替(flooding-drought, FD)4 个处理,每个处理 75 株,42 d 后,每个处理随机选取 15 株进行取样。其中,CK 和 CD 处理分别为保持田间持水量的 70%~80% 和 50%~55%,土壤水分含量采用称重法测定^[9];水淹状态为盆内水面超过土壤表面以上 5 cm;旱涝交替处理为前期水淹,中期干旱,后期恢复至正常供水。

1.2 指标测定与数据处理

胁迫 14、28 和 42 d 时,分别观察 5 种植物 4 个处理的形态变化,包括叶片和茎、根系变化,主要是叶色、叶形等,淹水处理的茎上是否有粗大皮孔形成,有无不定根生成等。参考相关文献^[10],将叶片萎蔫程度定为 6 级:I 级为长势良好,叶色正常,叶片没有萎蔫;II 级为生长一般,叶色基本正常,叶片开始萎蔫;III 级为叶片开始失水卷曲、稍下垂,叶色发黄或发灰,叶萎蔫量<20%;IV 级为叶片严重失水,叶柄变软,叶萎蔫量占 20%~50%;V 级为叶片卷曲下垂,叶萎蔫量占 50%~80%;VI 级为叶片全部萎蔫。

采用分光光度法测定叶片叶绿素,采用考马斯亮蓝 G-250 法测定可溶性蛋白质,氮蓝四唑(NBT)法测定 SOD 活性,硫代巴比妥酸比色法测定 MDA 含量^[11]。试验结束时对各项指标进行测定,每个处理重复 3 次。

采用 Excel 整理原始数据,以“平均值±标准误(mean±SE)”表示。采用 SPSS 19.0 软件进行数据分析,用 Duncan's 检验法进行差异显著性分析,显著性水平设定为 0.05,并采用 Origin 8.5 绘图;采用模糊隶属函数法进行植物抗逆性的综合评价。隶属函数的基本计算方法为 $R(X_j) = (X_j - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$,如果指标与抗逆性呈负相关,则: $R(X_j) = 1 - (X_j - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$ 。式中, X_j 为指标测定值, $X_{\min}$ 、 $X_{\max}$ 为所有参试材料某一指标的最小值和最大值^[12]。

2 结果与分析

2.1 旱涝胁迫对 5 种花灌木叶绿素的影响

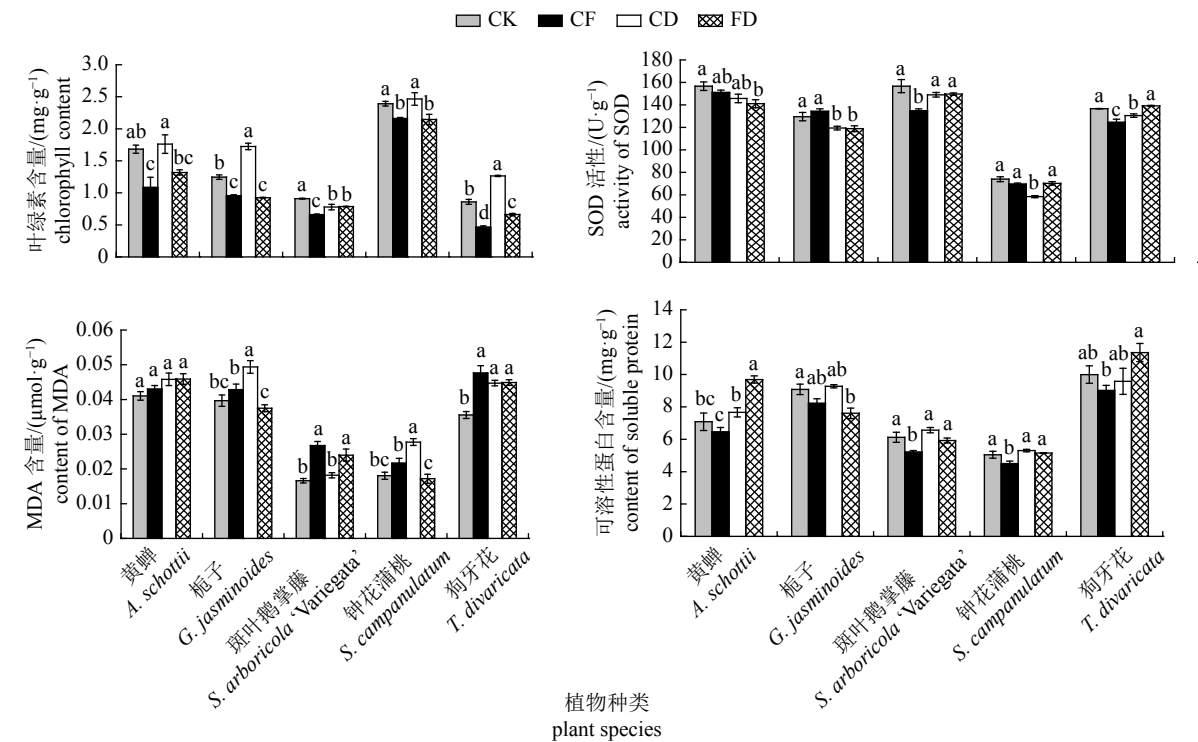
由图 1 可知:CF 组中 5 种花灌木的叶绿素总量都显著下降($P<0.05$),其中狗牙花下降幅度最大,为 46.00%,钟花蒲桃下降幅度最小,为 9.69%。CD 组中斑叶鹅掌藤的叶绿素总量降低了 14.49%,与 CK 组差异显著($P<0.05$);而其他 4 种花灌木的叶绿素总量则升高,其中狗牙花和栀子显著高于 CK 组($P<0.05$)。FD 组中 5 种花灌木叶绿素总量都降低,黄蝉、栀子、斑叶鹅掌藤、钟花蒲桃和狗牙花的叶绿素总量分别降低了 21.59%、25.80%、13.58%、10.30% 和 23.02%。

2.2 旱涝胁迫对 5 种花灌木 SOD 活性的影响

由图 1 可知:CF 组中栀子的 SOD 活性升高,而黄蝉、斑叶鹅掌藤、钟花蒲桃和狗牙花 SOD 活性分别下降了 3.57%、13.93%、5.92% 和 8.88%,其中斑叶鹅掌藤和狗牙花显著降低($P<0.05$)。CD 组的 5 种花灌木 SOD 活性都下降,其中钟花蒲桃、狗牙花和栀子显著降低($P<0.05$)。FD 组中只有狗牙花的 SOD 活性升高,其他 4 种花灌木都下降,其中黄蝉和栀子显著降低($P<0.05$)。说明旱涝交替胁迫下,黄蝉和栀子的 SOD 活性并未恢复至对照水平。

2.3 旱涝胁迫对 5 种花灌木丙二醛含量的影响

由图 1 可知:CF 组和 CD 组中 5 种花灌木的丙二醛含量均上升,CF 组中斑叶鹅掌藤和狗牙花的丙二醛含量与 CK 组差异显著($P<0.05$);CD 组中钟花蒲桃、狗牙花和栀子的丙二醛含量与 CK 组差异显著($P<0.05$)。说明干旱胁迫下钟花蒲桃、狗牙花和栀子膜质过氧化程度高,膜系统受伤害严重。FD 组中栀子和钟花蒲桃的丙二醛含量下降,斑叶鹅掌藤和狗牙花的丙二醛含量



注: 不同小写字母表示种内不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters indicate significant difference between different treatments within species at $P<0.05$.

图 1 旱涝胁迫下 5 种花灌木的生理指标

Fig. 1 The physiological indexes of five flowering shrubs under drought and waterlogging stress

显著上升 ($P<0.05$), 分别上升 44.46% 和 26.37%。说明旱涝交替胁迫下, 栀子和钟花蒲桃都已恢复正常水平, 斑叶鹅掌藤细胞膜质过氧化严重, 不能恢复正常水平。

2.4 旱涝胁迫对 5 种花灌木可溶性蛋白含量的影响

由图 1 可知: 5 种花灌木在旱涝胁迫下可溶性蛋白含量的变化各不相同。CF 组中 5 种花灌木的可溶性蛋白含量都降低, 其中钟花蒲桃和斑叶鹅掌藤显著降低 ($P<0.05$)。CD 组中, 黄蝉、栀子、斑叶鹅掌藤和钟花蒲桃的可溶性蛋白含量分别升高了 8.15%、2.17%、7.26% 和 5.18%, 而狗牙花的可溶性蛋白含量降低了 4.16%。FD 组中, 黄蝉、钟花蒲桃和狗牙花的可溶性蛋白含量都升高, 栀子和斑叶鹅掌藤可溶性蛋白含量都下降, 其中黄蝉、栀子与 CK 组差异显著 ($P<0.05$)。

2.5 5 种热带花灌木旱涝胁迫能力综合评价

2.5.1 耐旱性评价

5 种花灌木耐旱性从强到弱依次为斑叶鹅掌藤、狗牙花、黄蝉、栀子、钟花蒲桃, 此结果与形态表现一致 (表 1)。干旱胁迫下, 黄蝉、栀

子、斑叶鹅掌藤和狗牙花叶片都表现为发黄萎蔫, 钟花蒲桃叶片表现为卷曲萎蔫。胁迫 42 d 时, 几乎全部钟花蒲桃的叶片都有不同程度的卷曲, 表现为 VI 级; 超过 1/2 的栀子的下部叶片发黄萎蔫, 表现为 V 级; 黄蝉大多数叶片发黄萎蔫, 同时还伴有大量落叶, 也表现为 V 级。

2.5.2 耐涝性评价

5 种花灌木耐涝性从强到弱依次为栀子、钟花蒲桃、黄蝉、斑叶鹅掌藤、狗牙花 (表 1)。淹水胁迫下, 植物叶片伴随有不同程度的发黄萎蔫和脱落, 茎基部及根系变化各不相同。栀子主要表现为下部叶片发黄、焦枯, 出现症状较晚, 淹水胁迫 42 d, 栀子新根量增多; 黄蝉和钟花蒲桃在整个淹水期间都有新叶萌发, 后期部分叶片萎蔫。几乎全部黄蝉在淹水胁迫 14 d 形成少量肥大皮孔, 后期一直长出大量新根; 淹水胁迫 42 d 有几株钟花蒲桃长出呈螺旋状排列的短粗红色不定根, 分布在茎基部和靠近水面处; 斑叶鹅掌藤和狗牙花叶片发黄萎蔫情况出现较早, 狗牙花叶片脱落情况明显; 大部分狗牙花在淹水胁迫 14 d, 形成肥大皮孔, 从茎基部分布到水面交界处; 斑

表 1 5 种热带花灌木旱涝胁迫能力综合评价

Tab. 1 Comprehensive evaluation of drought and waterlogging stress ability of five tropical flowering shrubs

抗性 resistance	植物种类 plant species	Chl	SOD	MDA	SP	平均隶属函数 average subordinate function	排序 rank
耐旱性 drought resistance	ALSC	0.583	0.964	0.115	0.552	0.554	3
	GAJS	0.561	0.673	0.000	0.929	0.541	4
	SCAR	0.000	1.000	1.000	0.295	0.574	1
	SYCA	1.000	0.000	0.692	0.000	0.423	5
	TADI	0.288	0.796	0.151	1.000	0.559	2
耐涝性 waterlogging resistance	ALSC	0.367	1.000	0.177	0.434	0.495	3
	GAJS	0.289	0.794	0.185	0.824	0.523	1
	SCAR	0.115	0.801	0.800	0.156	0.468	4
	SYCA	1.000	0.000	1.000	0.000	0.500	2
	TADI	0.000	0.674	0.000	1.000	0.419	5
旱涝胁迫适应性 adaptability to drought and waterlogging stress	ALSC	0.443	0.893	0.000	0.732	0.517	1
	GAJS	0.177	0.613	0.293	0.396	0.370	5
	SCAR	0.084	1.000	0.763	0.124	0.493	3
	SYCA	1.000	0.000	1.000	0.000	0.500	2
	TADI	0.000	0.868	0.035	1.000	0.476	4

注/Note: ALSC. 黄蝉 (*A. schottii*); GAJS. 梔子 (*G. jasminoides*); SCAR. 斑叶鹅掌藤 (*S. arboricola* ‘Variegata’); SYCA. 钟花蒲桃 (*S. campanulatum*); TADI. 狗牙花 (*T. divaricata*)。

叶鹅掌藤在淹水胁迫 28 d 根开始腐烂, 胁迫 42 d 时, 根腐烂严重, 叶片大多萎蔫, 表现为 V 级; 而狗牙花叶片脱落严重, 表现为 VI 级。

2.5.3 旱涝交替适应性评价

5 种花灌木对旱涝交替胁迫的适应性从强到弱依次为黄蝉、钟花蒲桃、斑叶鹅掌藤、狗牙花、梔子(表 1)。旱涝交替胁迫下, 前 14 d 所有植株叶片表现与淹水胁迫组相同。复水后, 黄蝉和钟花蒲桃恢复明显, 都萌发了新叶, 分别表现为 I 级和 II 级; 而狗牙花不断脱叶, 胁迫结束时全部植株脱叶严重, 表现为 VI 级。

3 讨论

水分胁迫时植物正常的生理代谢会受到抑制, 使植物的生理生化过程等各方面发生一系列的变化, 这是植物对环境胁迫的反应以及对环境改变的适应结果^[13]。叶绿素作为植物体光合作用的基础物质, 其含量的高低直接反映了植物的生长状态和光合能力的高低, 大量研究表明逆境胁迫会不同程度的降低植物体叶片中叶绿素的含量^[14], 本试验中淹水胁迫下, 植物的叶绿素含量都显著降低 ($P<0.05$), 说明淹水胁迫对植物的叶绿素含量影响显著。干旱胁迫下, 梔子和狗牙花的叶绿素含量显著升高 ($P<0.05$), 可能是叶片相对含水量降低, 单位鲜重材料中叶绿素含量升高

所致^[15]。

在正常情况下, 植物体内的抗氧化酶系统通常使活性氧维持在动态平衡状态^[16], 当受到水分胁迫时就会打破植物细胞中的活性氧平衡, 活性氧积累, 使植物受到氧化伤害^[17], 这时作为抗氧化系统第一道防线的超氧化物歧化酶 (SOD) 会起到清除活性氧的作用^[15-16], 因此, SOD 活性能够反映其抗氧化的能力。本试验中淹水胁迫下斑叶鹅掌藤和狗牙花的 SOD 活性显著下降 ($P<0.05$), 与马剑等^[18]对文冠果幼苗的研究结果一致, 可能是试验后期, 其已无法适应淹水环境, SOD 清除不了大量产生的过氧离子导致活性明显下降。因此, 在绿地中应用时应避免将其种植在易积水的地方。本试验中干旱胁迫下钟花蒲桃和梔子的 SOD 活性显著下降 ($P<0.05$), 导致氧自由基积累, 膜的完整性遭到破坏, 说明其在干旱胁迫下抗氧化能力较弱。

在逆境胁迫下, 植物往往发生膜脂过氧化作用, MDA 是膜脂过氧化作用的产物之一, 其含量高低是细胞膜脂过氧化作用和植物受逆境胁迫损伤程度的重要指标^[19]。本试验中淹水和干旱胁迫下 5 种花灌木的丙二醛含量都上升, 与艾星梅等^[20]在干旱和淹水胁迫下千层金 MDA 含量都呈持续上升趋势的研究结果一致, 且丙二醛含量上升幅度大小与植物耐旱耐涝性强弱基本一致, 说明丙

二醛含量可以有效地反映植物对水分胁迫的适应性。旱涝交替胁迫下, 斑叶鹅掌藤和狗牙花的丙二醛含量显著升高 ($P<0.05$), 说明其细胞受伤害较大。

可溶性蛋白作为植物渗透调节溶质的重要组成部分, 其含量的增加有助于抵御逆境产生的不利影响, 增强植株对外界环境的适应性^[21]。本试验中 5 种花灌木在淹水胁迫下的可溶性蛋白含量都下降, 可能是淹水胁迫抑制了蛋白质的合成并诱导蛋白质的降解, 使植物体内蛋白质含量下降; 其中斑叶鹅掌藤和钟花蒲桃显著下降 ($P<0.05$), 显示其对淹水胁迫较敏感。干旱胁迫下斑叶鹅掌藤和黄蝉的可溶性蛋白含量升幅较大, 说明其在干旱胁迫下可产生可溶性蛋白增强适应性。旱涝交替胁迫下黄蝉可溶性蛋白含量显著升高 ($P<0.05$), 栀子则显著下降 ($P<0.05$), 说明在经历淹水—干旱—复水后, 黄蝉还是可以产生大量可溶性蛋白保护自身抵御水分胁迫, 而栀子可能对旱涝交替环境的适应能力较差。

4 结论

5 种花灌木的抗旱性从强到弱依次为斑叶鹅掌藤、狗牙花、黄蝉、栀子、钟花蒲桃; 5 种花灌木的耐涝性从强到弱依次为栀子、钟花蒲桃、黄蝉、斑叶鹅掌藤、狗牙花; 对旱涝交替胁迫的适应性从强到弱依次为黄蝉、钟花蒲桃、斑叶鹅掌藤、狗牙花、栀子。综合 5 种花灌木在旱涝胁迫下生理响应和形态变化, 表明黄蝉既耐涝又耐旱, 可配置于雨水花园和滨水河岸带等环境; 斑叶鹅掌藤和狗牙花耐旱而不耐涝, 是建设屋顶花园、节水型绿地的优良植物材料; 栀子和钟花蒲桃耐涝而不耐旱, 可配置于滨水绿带、淡水湿地或土壤较为湿润的环境等。

【参考文献】

- [1] 王佳, 王思思, 车伍. 低影响开发与绿色雨水基础设施的植物选择与设计[J]. 中国给水排水, 2012, 28(21): 45. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4602.2012.21.013.
- [2] 翁殊斐, 朱锦心, 苏志尧, 等. 岭南地区滨水绿地植物景观质量评价[J]. 林业科学, 2017, 53(1): 21. DOI: 10.11707/j.1001-7488.20170103.
- [3] 杨建伟, 孙桂芳, 赵丹, 等. 干旱胁迫对 3 种灌木生长及叶水分生理的影响[J]. 林业与生态科学, 2018, 33(4): 423. DOI: 10.13320/j.cnki.hjfor.2018.0065.
- [4] 丁雪丹, 张继红, 梅亚茹, 等. 干旱胁迫对 5 种花境植物形态的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(2): 53. DOI: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2019.02.009.
- [5] 董鹏, 李铭, 马新, 等. 干旱胁迫对 5 个园林绿化树种生理生化特性的影响[J]. 西南农业学报, 2018, 31(4): 699. DOI: 10.16213/j.cnki.scjas.2018.4.010.
- [6] 刘维君, 李宗艳, 杨壁嘉, 等. 5 种地被植物抗旱生理及差异比较[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2017, 42(7): 18. DOI: 10.13718/j.cnki.xsxb.2017.07.004.
- [7] LI S, PEZESHKI S R, GOODWIN S. Effects of soil moisture regimes on photosynthesis and growth in cattail (*Typha latifolia*)[J]. Acta Oecologica, 2004, 25(1/2): 17. DOI: 10.1016/j.actao.2003.10.004.
- [8] LI S, MARTIN L T, PEZESHKI S R, et al. Responses of black willow (*Salix nigra*) cuttings to simulated herbivory and flooding[J]. Acta Oecologica, 2005, 28(2): 173. DOI: 10.1016/j.actao.2005.03.009.
- [9] 刘全勇, 卢锟, 李泽, 等. 水分胁迫对刨花润楠幼苗生长及光合特性的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(9): 30. DOI: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2016.09.006.
- [10] 邓辉茗, 龙聪颖, 蔡仕珍, 等. 不同水分胁迫对绵毛水苏幼苗形态和生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2018, 38(6): 1101. DOI: 10.7606/j.issn.1000-4025.2018.06.1099.
- [11] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [12] 黄承玲, 陈训, 高贵龙. 3 种高山杜鹃对持续干旱的生理响应及抗旱性评价[J]. 林业科学, 2011, 47(6): 50.
- [13] 苏慧敏, 何丙辉, 蔡兴华, 等. 水分胁迫对太阳扇扦插苗形态和生理特征的影响[J]. 生态学杂志, 2011, 30(10): 2188. DOI: 10.13292/j.1000-4890.2011.0290.
- [14] 廖德志, 陈家法, 刘球, 等. 水涝胁迫对不同种源青冈栎幼苗叶绿素含量和抗氧化酶活性的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(9): 6. DOI: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2017.09.001.
- [15] 侯舒婷, 张倩, 刘思岑, 等. 黄金香柳对水分胁迫的生长与生理响应[J]. 西北植物学报, 2014, 34(12): 2498. DOI: 10.7606/j.issn.1000-4025.2014.12.2491.
- [16] 王娟. 淹水对牡丹生理特性的影响[J]. 生态学杂志, 2015, 34(12): 3345. DOI: 10.13292/j.1000-4890.2015.0305.
- [17] 王琪, 刘建鑫, 张建军, 等. 水分胁迫对芍药生长和生理生化特性影响的研究[J]. 植物遗传资源学报, 2014, 15(6): 1276. DOI: 10.13430/j.cnki.jpgr.2014.06.015.
- [18] 马剑, 刘贤德, 孟好军, 等. 水分胁迫对文冠果幼苗生长及生理特性的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(1): 128. DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.2018.020.
- [19] CATOLA S, MARINO G, EMILIANI G, et al. Physiological and metabolomic analysis of *Punica granatum* (L.) under drought stress[J]. Planta, 2016, 243(2): 444. DOI: 10.1007/s00425-015-2414-1.
- [20] 艾星梅, 杨越, 徐永艳, 等. 千层金幼苗部分生理指标对水分胁迫的响应[J]. 北方园艺, 2014(2): 75.
- [21] 李琬婷, 黄轩, 程小毛, 等. 铅胁迫对中华常春藤生长和生理特性的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2019, 34(1): 108. DOI: 10.12101/j.issn.1004-390X(n).201711066.

责任编辑: 何馨成